

**С.Н. Царенко /к.т.н./, И.И. Бридун /к.т.н./, М.В. Бридун**  
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

## УСТОЙЧИВОСТЬ НЕВЕСОМОГО РАСТЯНУТО-СЖАТОГО СТЕРЖНЯ, МОДЕЛИРУЮЩЕГО РАБОТУ СТАЛЬНОЙ КРЕПИ ПРИ СПУСКЕ НА ПЛАВУ

*В статье рассмотрена задача устойчивости стальной крепи во время спуска на плаву как упругого невесомого стержня, испытывающего сжатие с растяжением. Расчетная схема имеет существенное отличие от схем, которые были рассмотрены в задачах устойчивости бурильных труб. Таким образом, сформулирована задача об определении критической нагрузки и получены расчетные зависимости, описывающие напряженно-деформированное состояние продольно-поперечного изгиба обсадной колонны с учетомстыковки растянутого и сжатого участков. На основе исследования уравнения устойчивости получена графическая зависимость влияния гибкости обсадных труб на значение критической нагрузки. В качестве примера найдена критическая длина обсадной колонны в соответствии с принятой технологической схемой спуска, которая была использована для крепления ствола диаметром 4,3 м и глубиной 385 м на шахте «Юбилейной» в Донецкой области в 2012 г. Выполнено сравнение значения критической длины колонны с известным результатом, полученным на основе модели весомого стержня.*

**Ключевые слова:** стальная крепь, спуск на плаву, устойчивость сжатого стержня, обсадная труба, продольно-поперечный изгиб.

### Постановка проблемы

Сооружение скважин большого диаметра включает в себя следующие этапы: оснащение комплекса поверхности, проходку устья, бурение, крепление и тампонаж, откачуку буровой жидкости, проверку состояния крепи. Значительное влияние на технико-экономическую эффективность способа бурения оказывают конструкция крепи и технология ее возведения.

В отечественной практике после окончания бурения скважины большого диаметра крепят обсадными металлическими трубами. В состав работ по креплению скважины входят: монтаж обсадных колонн и заполнение закрепленного пространства. В свою очередь, монтаж осуществляется одним из двух способов: секционным способом – скважины крепят секциями, или погружным способом – сплошной колонной. Секции или колонна свариваются из отдельных обсадных труб. При креплении скважины секции стыкуют с помощью специальных стыковочных устройств. Погружной способ включает в себя спуск на плаву или на воздушной подушке.

Закрепное пространство тампонируют с целью обеспечения равномерного воздействия на крепь горного и гидростатического давления; предотвращения водогазопроявления; защиты обсадных труб от коррозии; закрепления промежуточных колонн в процессе бурения скважин.

Снижение функциональности стальной кре-

пи происходит с увеличением диаметра стволов, то есть перехода от элемента крепления к роли постоянной опалубки, при этом неизбежно снижается технологичность возведения и увеличивается ее материалоемкость. С учетом этого технология эксплуатации ствола предусматривает организацию дренажа, что позволяет разгрузить стальную оболочку от внешнего давления и тем самым упразднить ее работу как элемента крепления. Таким образом, основная нагрузка, которую воспринимает стальная крепь, сводится к той, что возникает во время монтажа.

Зачастую при бурении скважин большого диаметра грузоподъемность буровой установки выбирают по весу обсадной колонны, которую предстоит опускать в скважину. В последнее время наиболее распространен спуск колонн секциями, но он сопряжен со значительным увеличением времени крепления скважин, причем не исключаются случаи неплотнойстыковки секций, что осложняет тампонаж и последующую эксплуатацию скважин. В свою очередь, спуск колонны на плаву является наиболее простым и эффективным способом, но ограничен допустимым внешним давлением на колонну.

### Анализ последних исследований и публикаций

При креплении ствола диаметром 4,3 м, глубиной 385 м, который предполагалось оборудо-

вать для клетевого подъема на шахте «Юбилейной» в Донецкой области (Украина), ПАО «Донецкое ШПУ» был выбран способ спуска обсадной трубы на плаву с целью обеспечения вертикальности ствола в соответствии с требованиями СОУ 10.1.00174131.004-2006 [1]. Профилировка, составленная после осушения ствола, показала, что, начиная с отметки 110 м, происходит искривление оси ствола, а ее увод от вертикали на максимальной глубине составил 0,5 м (при 0,1 м допускаемой величины). С учетом того, что пробуренный ствол имел необходимое сечение в свету для отвесного спуска колонны, возникло предположение, что искривление оси обсадной трубы произошло за счет потери продольной устойчивости.

Проектирование крепи было выполнено в соответствии с ОНТП 03-80 [2], где обсадная труба рассчитывается как цилиндрическая оболочка, усиленная шпангоутами, под действием внешнего давления на прочность и устойчивость. Расчет технологических параметров спуска на плаву сделан с учетом рекомендаций [3,4], согласно которым влияние осевой нагрузки в прочностных расчетах учитывается как дополнительное напряжение от сжатия. Таким образом, принятые на предприятии методы расчета и проектирования обсадной колонны не рассматривают специфику ее работы при спуске на плаву как гибкого весомого стержня.

Впервые задача об устойчивости весомого стержня с двумя опретыми концами была поставлена и решалась учеными Р. Эйлером, а в дальнейшем А. Гринхиллом для свободного верхнего и защемленного нижнего концов [5]. Впервые в горном деле для расчета бурильных колонн решение по определению критических длин с применением функций Бесселя было получено А.Н. Динником [6], однако в своей работе он использовал ту же постановку задачи, что и А. Гринхилл, поэтому найденное решение позволило рассмотреть лишь некоторые случаи граничных условий. Задачи устойчивости растянуто-сжатого стержня применительно к расчету бурильных колонн были впервые рассмотрены Г. Вудсом и А. Лубинским [7] с использованием степенных рядов и А.Е. Сарояном [8] с использованием функций Бесселя. При этом А.Е. Сароян полагал, что уравнение равновесия на участках растяжения и сжатия одно и то же, и поэтому не использовал условия сопряжения этих участков. Решение для продольно-поперечного изгиба весомого стержня с использованием степенных рядов найдено Ф.Л. Шевченко [9]. Универсальная формула для расчета напряженно-деформированного состояния весомого стержня

при различных внешних нагрузках и граничных условиях в функциях Бесселя и Ломмеля получена Г.М. Улитиным [10]. Отдельные задачи продольно-поперечного изгиба и устойчивости неклассических стержневых систем с применением специальных функций рассмотрены в работах [11-14]. Обзор основных методов исследования деформирования и устойчивости конструкций при статическом и динамическом нагружении представлен в литературе [15-17].

### Цель (задачи) исследования

Целью настоящей работы является разработка инженерного подхода к оценке устойчивости обсадной колонны, учитывающего специфику технологии спуска на плаву как гибкого невесомого стержня.

### Основной материал исследования

С учетом специфики расчетной схемы (рис. 1), которая является геометрически изменяемой, что влияет на постановку задачи об определении критической нагрузки, а не длины, нельзя непосредственно использовать расчетные зависимости, полученные в работе [10].

Спуск обсадной колонны на плаву является одним из наиболее распространенных способов монтажа. Суть процесса заключается в ограничении нагрузки на буровую установку за счет постепенного погружения трубы с заглушенным торцом. Таким образом, верхний участок трубы испытывает состояние растяжения. На днище действует выталкивающая сила, вызывая сжатие нижней части колонны. В качестве расчетной модели рассмотрим упругий стержень длиной  $l$  и весом, приложенным к нейтральному сечению (см. рис. 1). Положение нейтрального сечения (длину участка растяжения  $l_p$ ) определим через грузоподъемность буровой установки  $G$  и по-

гонную плотность трубы  $q$ ,  $l_p = \frac{G}{q}$ . Длина участка сжатия будет определяться через выталкивающую силу  $N_0$ , действующую на нижний конец стержня  $l_c = \frac{N_0}{q}$ . Решение дифференциального уравнения в случае продольно-поперечного изгиба однородного стержня известно, и по методу начальных параметров уравнение изогнутой оси имеет вид [9]:

– на участке растяжения ( $0 \leq x \leq l_p$ )

$$y(x) = y_0 + \frac{\theta_0}{k_1} \sinh k_1 x - \frac{M_0}{k_1^2 EJ} (1 - \cosh k_1 x) - \frac{P_0}{k_1^3 EJ} (k_1 x - \sinh k_1 x), \quad (1)$$

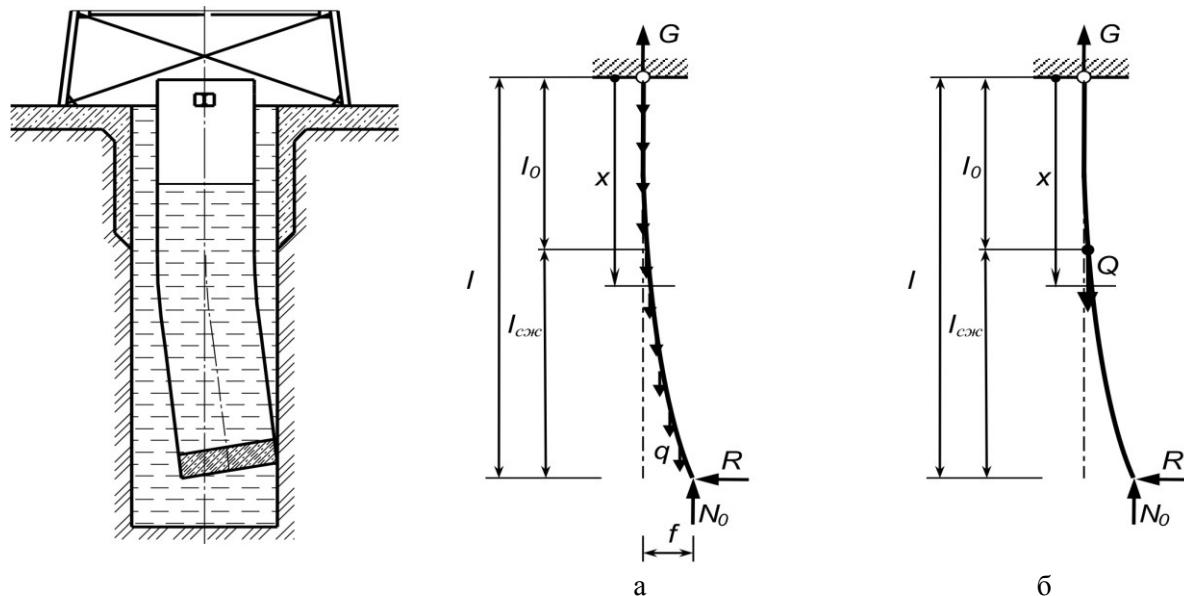


Рис. 1. Схема потери устойчивости обсадной трубы:

*a* – расчетная схема колонны как весомого стержня;  
*б* – расчетная схема колонны как невесомого стержня

– на участке сжатия ( $0 \leq x \leq l_p$ )

$$y(x) = y_0^* + \frac{\theta_0^*}{k_2} \sin k_2 x + \frac{M_0^*}{k_2^2 EJ} (1 - \cos k_2 x) + \frac{P_0^*}{k_2^3 EJ} (k_2 x - \sin k_2 x), \quad (2)$$

где  $y_0$ ,  $\theta_0$ ,  $M_0$ ,  $P_0$  – начальные параметры: прогиб, угол поворота, изгибающий момент, поперечная сила при ( $x=0$ ), соответственно для участков растяжения и сжатия,  $EJ$  – изгибная жесткость трубы,  $k_1 = \sqrt{\frac{G}{EJ}}$ ,  $k_2 = \sqrt{\frac{N_0}{EJ}}$ .

Исходя из специфики рассматриваемой схемы для задачи устойчивости, используем аналогичный подход, как в работе [18], введем следующие обозначения:  $\lambda = \sqrt{\frac{ql_p^3}{EJ}}$ ,  $\xi = \frac{x}{l_p}$ ,  $\chi = \frac{l_c}{l_p}$ . Подставляя принятые обозначения в уравнения (1)-(2), а также учитывая, что  $\frac{d\xi}{dx} = \frac{1}{l_p}$ , из дифференциальных зависимостей получаем уравнения прогибов, углов поворота, изгибающих моментов и поперечных сил:

– на участке растяжения ( $0 \leq \xi \leq 1$ )

$$y(\xi) = l_p \left( y_0 + \frac{\theta_0}{\lambda} \sinh \lambda \xi - \frac{M_0}{q l_p^2} \times \right. \\ \left. \times (1 - \cosh \lambda \xi) - \frac{P_0}{\lambda q l_p} (\lambda \xi - \sinh \lambda \xi) \right),$$

$$\theta(\xi) = \theta_0 \cosh \lambda \xi + \frac{M_0 \lambda}{q l_p^2} \sinh \lambda \xi - \frac{P_0}{q l_p} (1 - \cosh \lambda \xi), \quad (3)$$

$$M(\xi) = \frac{EJ}{l_p} \left( \begin{array}{l} \theta_0 \lambda \sinh \lambda \xi + \frac{M_0 \lambda^2}{q l_p^2} \cosh \lambda \xi + \\ + \frac{P_0 \lambda}{q l_p} \sinh \lambda \xi \end{array} \right),$$

$$Q(\xi) = \frac{EJ}{l_p^2} \left( \begin{array}{l} \theta_0 \lambda^2 \cosh \lambda \xi + \frac{M_0 \lambda^3}{q l_p^2} \sinh \lambda \xi + \\ + \frac{P_0 \lambda^2}{q l_p} \cosh \lambda \xi \end{array} \right),$$

– на участке сжатия ( $0 \leq \xi \leq \chi$ )

$$y(\xi) = l_p \left( \begin{array}{l} y_0^* + \frac{\theta_0^*}{\lambda \sqrt{\chi}} \sin(\lambda \xi \sqrt{\chi}) + \\ + \frac{M_0^*}{\chi q l_p^2} (1 - \cos(\lambda \xi \sqrt{\chi})) + \\ + \frac{P_0^*}{\lambda \chi^{3/2} q l_p} (\lambda \xi \sqrt{\chi} - \sin(\lambda \xi \sqrt{\chi})) \end{array} \right),$$

$$\theta(\xi) = \theta_0^* \cos(\lambda \xi \sqrt{\chi}) + \frac{M_0^* \lambda}{\sqrt{\chi} q l_p^2} \sin(\lambda \xi \sqrt{\chi}) + \frac{P_0^*}{\chi q l_p} (1 - \cos(\lambda \xi \sqrt{\chi})), \quad (4)$$

$$M(\xi) = \frac{EJ}{l_p} \begin{cases} -\theta_0^* \lambda \sqrt{\chi} \sin(\lambda \xi \sqrt{\chi}) + \\ + \frac{M_0^* \lambda^2}{ql_p^2} \cos(\lambda \xi \sqrt{\chi}) + \\ + \frac{P_0^* \lambda}{\sqrt{\chi} ql_p} \sin(\lambda \xi \sqrt{\chi}) \end{cases},$$

$$Q(\xi) = \frac{EJ}{l_p^2} \begin{cases} -\theta_0^* \lambda^2 \chi \cos(\lambda \xi \sqrt{\chi}) - \\ - \frac{M_0^* \lambda^3 \sqrt{\chi}}{ql_p^2} \sin(\lambda \xi \sqrt{\chi}) + \\ + \frac{P_0^* \lambda^2}{ql_p} \cos(\lambda \xi \sqrt{\chi}) \end{cases}.$$

Рассмотрим устойчивость обсадной трубы в процессе спуска, для этого необходимо, чтобы уравнения (3) и (4) удовлетворяли условию со-пряжения растянутого и сжатого участков и гра-ничным условиям закрепления.

Из шарнирного закрепления верхнего торца получаем:  $y_0=0$ ,  $M_0=0$ . Оставшиеся шесть усло-вий имеют вид:

$$\begin{aligned} y_0^* &= y_1(0), \quad \theta_0^* = \theta_1(0), \quad M_0^* = M_1(0), \\ P_0^* &= P_0, \quad M_2(\chi) = 0, \quad Q_2(\chi) + ql_c \theta_2(\chi) = 0, \end{aligned} \quad (5)$$

где индекс «1» использован для участка растя-жения, «2» – сжатия.

Используя первые четыре соотношения из условий (5), составим выражения для углов по-вортова и поперечных сил на участке сжатия:

$$\theta_2(\xi) = \theta_0 \begin{cases} \cosh \lambda \cos(\lambda \xi \sqrt{\chi}) + \\ + \frac{1}{\sqrt{\chi}} \sinh \lambda \sin(\lambda \xi \sqrt{\chi}) \end{cases} +$$

$$+ \frac{P_0}{ql_p} \begin{cases} - (1 - \cosh \lambda) \cos(\lambda \xi \sqrt{\chi}) + \\ + \frac{1}{\sqrt{\chi}} \sinh \lambda \sin(\lambda \xi \sqrt{\chi}) + \\ + \frac{1}{\chi} (1 - \cos(\lambda \xi \sqrt{\chi})) \end{cases}, \quad (6)$$

$$\begin{aligned} Q_2(\xi) = \frac{EJ}{l_p^2} \left( \theta_0 \lambda^2 \chi \begin{cases} - \cosh \lambda \cos(\lambda \xi \sqrt{\chi}) - \\ - \frac{1}{\sqrt{\chi}} \sinh \lambda \sin(\lambda \xi \sqrt{\chi}) \end{cases} + \right. \\ \left. + \frac{P_0 \lambda^2 \chi}{ql_p} \begin{cases} (1 - \cosh \lambda) \cos(\lambda \xi \sqrt{\chi}) - \\ - \frac{1}{\sqrt{\chi}} \sinh \lambda \sin(\lambda \xi \sqrt{\chi}) + \frac{1}{\chi} \cos(\lambda \xi \sqrt{\chi}) \end{cases} \right). \end{aligned} \quad (7)$$

Подставив полученные соотношения (6) и (7) в последнее из условий (5), находим  $P_0=0$ , тогда из предпоследнего условия (5) получим выраже-ние для нахождения собственных значений уравнения устойчивости:

$$\tanh \lambda = \sqrt{\chi} \tan(\lambda \xi \sqrt{\chi}). \quad (8)$$

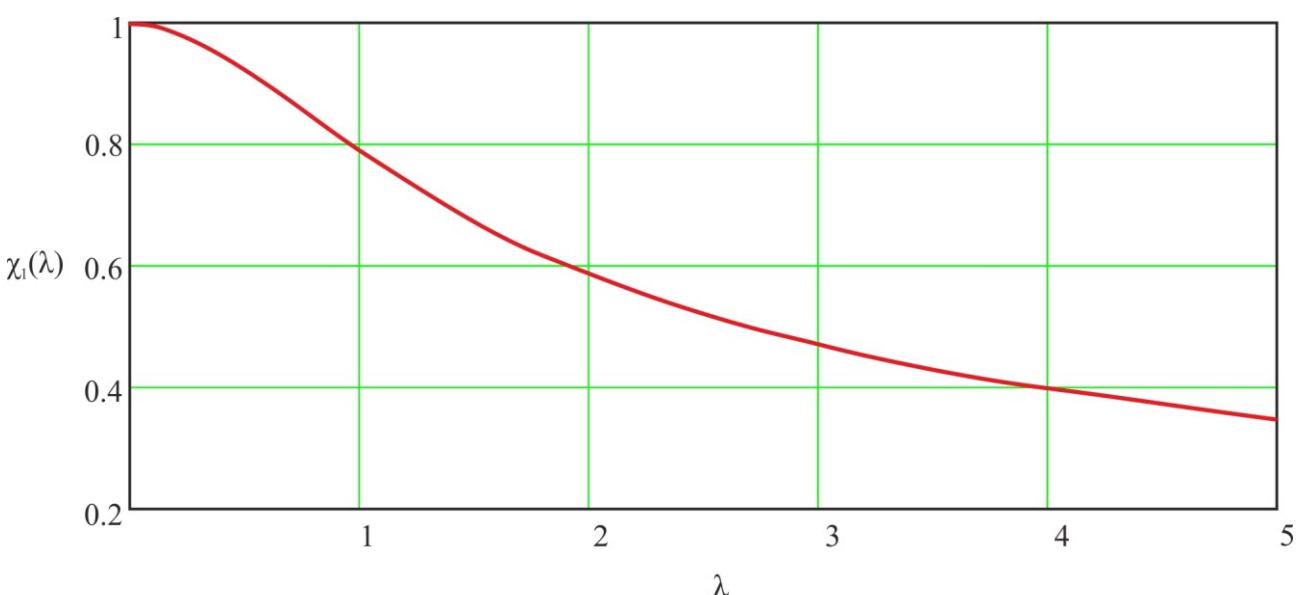


Рис. 2. Зависимость относительной длины сжатого участка от гибкости колонны

Численные исследования зависимости (8) представлены на графике рис. 2. Из графика следует, что при  $\lambda \rightarrow 0$  ( $EJ \rightarrow \infty$ )  $\chi \rightarrow 1$ , что соответствует предельному значению  $\chi$ , при котором обсадная труба находится в состоянии устойчивого равновесия, как «абсолютно жесткий» стержень.

Рассмотрим устойчивость исследуемой трубы в процессе спуска. Параметры конструкции имеют следующие значения: диаметр трубы 4,3 м, толщина стенки 16 мм ( $EJ = 1,02 \cdot 10^{11}$  Нм<sup>2</sup>), погонный вес  $q = 21$  кН/м, максимальная нагрузка на монтажную балку 2,8 МН, длина участка растяжения составит:  $l_p = \frac{2,8 \cdot 10^3}{21} = 133$  м, соответственно, найдем значение параметра гибкости:  $\lambda = \sqrt{\frac{ql_p^3}{EJ}} = 0,695$ ,  $\chi = 0,877$ , откуда находим  $l_c = \chi l_p = 117$  м, соответственно, полная длина колонны составит:  $l_{kp} = 250$  м. Следует отметить, что для весомого стержня критическое значение длины для рассматриваемого случая составляет:  $l_{kp} = 253$  м [18].

## Выводы

В работе предложена модель невесомой стержневой системы, находящейся в состоянии продольно-поперечного изгиба. Верхняя часть системы находится в состоянии растяжения, а нижняя – в состоянии сжатия. Система моделирует колонну в процессе ее спуска и позволяет исследовать ее параметры напряженно-деформированного состояния и устойчивости. Сравнение результатов расчета на устойчивость по упрощенной невесомой модели с известными результатами, полученными для весомого стержня, моделирующего колонну [11], показало высокую точность (для рассматриваемого примера погрешность составила менее 1 %).

Таким образом, предлагаемая модель может быть положена в основу инженерных методов выбора технологического регламента при спуске обсадных колонн на плаву.

## Список литературы

- Подземные горные выработки угольных шахт. Правила выполнения работ / Стандарт Организации Украины СОУ 10.1.00174131. 004-2006. – К.: Минуглепром Украины, 2006. – 72 с.
- Общесоюзные нормы технологического проектирования шахтных стволов и скважин, сооружаемых способом реактивно-турбинного бурения (РТБ): ОНТП 03-80. – М.: Минуглепром СССР, 1980. – 74 с.
- Жиленко, Н.П. Справочное пособие по реактивно-турбинному бурению / Н.П. Жиленко, А.А. Краснощек. – М.: Недра, 1987. – 309 с.
- Добровольский, Г.Б. Крепление скважин большого диаметра / Г.Б. Добровольский, Д.М. Казикаев, В.П. Петриченко. – М.: Недра, 1988. – 238 с.
- Пановко, Я.Г. Устойчивость и колебания упругих систем / Я.Г. Пановко, И.И. Губанова. – М.: Недра, 1979. – 384 с.
- Динник, А.Н. Избранные труды. – К.: АН УССР, 1958. – Т.1. – 151 с.
- Вудс, Г. Искривление скважин при бурении / Г. Вудс, А. Лубинский. – М.: Гостоптехиздат, 1960. – 161 с.
- Сароян, А.Е. Теория и практика работы бурильной колонны. – М.: Недра, 1990. – 264 с.
- Шевченко, Ф.Л. Механика упругих деформируемых систем. В 2-х ч. Ч.1. Напряженно-деформированное состояние стержней. – Донецк: ДГТУ, 2006. – 293 с.
- Улитин, Г.М. Устойчивость буровой установки роторного типа // Проблемы прочности. – 2002. – №1. – С. 130-135.
- Tsarenko, S.N. Investigation of strained deformed state of variable stiffness rod [Электронный ресурс] / S.N. Tsarenko. – Режим доступа: <https://springerplus.springeropen.com/articles/10.1186/2193-1801-3-367>
- Царенко, С.Н. Продольно-поперечный изгиб стержней переменной жесткости / С.Н. Царенко // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2016. – №1(685). – С. 5-13.
- Царенко, С.Н. Устойчивость весомых стержней переменного сечения / С.Н. Царенко // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: строительство и архитектура. – 2016. – №46(65). – С. 68-74.
- Улитин, Г.М. Продольно-поперечный изгиб и устойчивость весомой стержневой системы / Г.М. Улитин, С.Н. Царенко // Строительная механика и расчет сооружений. – 2017. – №2 (271). – С. 18-23.
- Yoo, C.H. Stability of structures: principles and applications / C.H. Yoo, S.C. Lee. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2011. – 536 p.
- Yang, B. Stress, Strain and Structural Dynamics: An Interactive Handbook of Formulas, Solutions, and MATLAB Toolboxes. – Cambridge: Elsevier Academic Press, 2005. – 960 p.
- Clough, R.W. Dynamics of structures / R.W. Clough., J. Penzien. – McGraw-Hill, 1975. – 634 p.
- Царенко, С.Н. Устойчивость стальной крепи при спуске на плаву // Изв. вузов. Горный журнал. – 2014. – Вып.7. – С. 48-55.

## STABILITY OF WEIGHTLESS STRETCHED-COMPRESSED ROD SIMULATING THE WORK OF STEEL SUPPORTS AT DESCENT AFLLOAT

**Background.** As a rule, when drilling large diameter wells, the loading capacity of the drilling rig is selected by the weight of the casing string, which will be lowered into the well. There are three special ways of lowering the casing, if its weight exceeds the carrying capacity of the drilling rig: on the air cushion, afloat or by sections.

**Materials and/or methods.** When mounting a shaft of diameter 4.3 m, depth 385 m, for the crate hoist at the mine "Yubileynaya", PJSC "Donetsk ShPU", the floating method of the casing descent chosen to ensure the verticality of the shaft in accordance with the requirements of SOU 10.1.00174131.004-2006. Given that the drilled well had the necessary cross-section in the light for the vertical descent of the casing assumed that the curvature of the casing axis was due to the loss of longitudinal stability. The essence of the process of lowering the casing afloat is to limit the load on the drilling rig due to the gradual immersion of the pipe with a muffled end. Thus, the upper section of the pipe experiences a state of tension. The buoyancy force acts at the bottom, causing compression of the lower part of the casing. As a computation model considered an elastic rod of length  $l$  and weight  $Q$  attached to the neutral section. The position of the neutral section (the length of the stretch section  $l_p$ ) determined by the carrying capacity of the drilling rig and the linear density of the pipe  $q$ ,  $l_p = \frac{G}{q}$ . The length of the compression section determined by the buoyancy force  $N_0$  acting on the lower end of the rod  $l_c = \frac{N_0}{q}$ .

**Results.** A model of a weightless rod system, which is in a state of longitudinal-transverse bending, proposed. The upper part of the system is in a state of tension, and the lower in a state of compression. The system simulates the casing during its descent and allows investigating its parameters of stress-strain state and stability. Comparison of the stability calculation results for the simplified weightless model with the known results obtained for the weight rod of the modeling casing string showed high accuracy (in the example considered the error was less than 1 %).

**Conclusion.** Thus, the proposed model can be used as a basis for engineering methods of selecting technological regulations when lowering casing strings afloat.

**Keywords:** steel support, descent afloat, stability of compressed rod, casing string, longitudinal-transverse bending.

### Сведения об авторах

#### С.Н. Царенко

SPIN-код: 4554-4579  
Author ID: 758077  
Телефон: +380 (66) 031-53-01  
Эл. почта: tzarenko@gmail.com

#### И.И. Бридун

SPIN-код: 4856-8561  
Author ID: 851115  
ORCID iD: 0000-0002-3199-8518  
Телефон: +380 (71) 332-80-60  
Эл. почта: ss13835@yandex.ru

#### М.В. Бридун

Телефон: +380 (95) 335-64-48  
Эл. почта: noktian@yandex.ua

Статья поступила 30.03.2018 г.

© С.Н. Царенко, И.И. Бридун, М.В. Бридун, 2018  
Рецензент д.т.н., проф. О.Е. Шабаев